

УДК 532.695

# ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ РОТОРНО- ПУЛЬСАЦИОННОГО АППАРАТА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОВЯЗКИХ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

**Б.И. Басок**

Доктор технических наук, заместитель директора\*  
Контактный тел. (044) 456-92-72

**Б.В. Давыденко**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник\*  
Контактный телефон: (044) 424-96-44  
E-mail: bdavydenko@ukr.net

**А.Н. Ободович**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник\*  
Контактный тел.: (044) 424-02-79  
E-mail: icsushka@gmail.com

\*Институт технической теплофизики НАН Украины  
ул. Булаховского, 2, г. Киев, Украина, 03164

*Представлены результаты численного моделирования динамики высоковязкой неньютоновской жидкости и теплопереноса в рабочем объеме роторно-пульсационного аппарата. На примере соевой пасты, относящейся к реологическим средам, исследовано влияние концентрации сухих веществ в пасте на степень перегрева обрабатываемой среды в роторно-пульсационном аппарате*

## 1. Введение

Роторно-пульсационные аппараты (РПА), как высокоэффективные устройства для получения мелкодисперсных эмульсий из гетерогенных жидких систем, широко используются в пищевой, химической и перерабатывающей промышленности [1]. Рабочими органами данных аппаратов являются коаксиальные цилиндрические тела. Одна часть цилиндрических тел жестко закреплена (статоры). Другая же часть (роторы), вращается с высокой угловой скоростью. Роторы и статоры, разделенные узкими зазорами и снабженные радиальными прорезями, располагаются последовательно. Вращающиеся роторы создают в потоке пульсации скорости и давления, что обеспечивает условия для интенсивного дробления дисперсных частиц в гетерогенной среде.

В большинстве случаев обрабатываемые в РПА среды относятся к высоковязким неньютоновским жидкостям. Характерным примером таких сред является разбавленная водой соевая паста, широко используемая в ряде пищевых технологий. Важной проблемой, возникающей при эксплуатации РПА, является перегрев обрабатываемого вещества, вызванный диссипацией энергии в потоке. В связи с этим для выбора оптимальных режимов эксплуатации указанных устройств необходимо установить допустимые пределы повышения температуры среды с целью предотвращения вызванного перегревом ухудшения ее качественных характеристик.

В данной работе методом численного моделирования исследована динамика жидкости и теплоперенос в рабочем пространстве РПА при обработке соевой пасты с различным процентным содержанием водной

фракции С. На основании результатов расчета определены уровни повышения температуры обрабатываемой среды в зависимости от концентрации воды в пасте.

## 2. Постановка задачи численного моделирования

Для численного моделирования динамики жидкости и теплопереноса в рабочей зоне РПА система уравнений переноса импульса и энергии записывается в полярной системе координат, связанной с общей осью цилиндрических рабочих элементов. Для случая неньютоновской жидкости данная система уравнений, согласно [2], имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(v_r r)}{\partial r} + \frac{\partial \omega}{\partial \theta} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(v_r^2 r)}{\partial r} + \frac{\partial(v_r \omega)}{\partial \theta} - \omega^2 r \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{2}{r} \mu \left( \frac{\partial \omega}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \mu \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \mu \frac{\partial \omega}{\partial r} \right); \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 v_r \omega)}{\partial r} + \frac{\partial \omega^2}{\partial \theta} + \frac{v_r \omega}{r} \right) = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ 2 \mu \left( \frac{\partial \omega}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right) \right] + \frac{1}{r^3} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( r^2 \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) \right]; \quad (3)$$

$$C_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r v_r T)}{\partial r} + \frac{\partial(T \omega)}{\partial \theta} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \mu \dot{\gamma}^2 \quad (4)$$

$$\mu = \left( \frac{\sigma_0}{\dot{\gamma}} + A \cdot \dot{\gamma}^{k-1} \right); \quad (5)$$

$$\dot{\gamma} = \left[ 2 \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial \omega}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + r \frac{\partial \omega}{\partial r} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где  $r, \theta$  – радиальная и угловая координаты;  $v_r, \omega$  – радиальная и угловая скорости течения жидкости;  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $\rho$  – плотность;  $\dot{\gamma}$  – скорость деформации потока;  $C_p$  – коэффициент теплоемкости;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\mu$  – эффективный динамический коэффициент вязкости;  $\tau$  – время;  $\sigma_0, A, k$  – эмпирические коэффициенты модели Гершеля-Балкли, с которой, согласно [3], согласуются реологические свойства соевой пасты.

Граничные условия к системе уравнений (1) – (4) и метод ее конечно-разностного решения применительно к случаю течения жидкости с постоянными свойствами в рабочей зоне РПА рассмотрены в [4]. Для случая течения неньютоновской жидкости используется аналогичная процедура численного решения исходной системы уравнений, но при этом эффективная вязкость определяется методом последовательных приближений, исходя из результатов расчета по формуле (6) величин скоростей деформации потока на каждом последующем шаге итераций. Значения коэффициентов  $\sigma_0, A$ ; и  $k$  в реологической модели (5) для соевой пасты с различным процентным содержанием воды приведены в [3]. Зависимости коэффициентов эффективной вязкости  $\mu$  от скорости деформации по-

тока  $\dot{\gamma}$  для температуры среды  $40^\circ\text{C}$ , полученные на основании результатов работы [3], представлены на рис. 1.

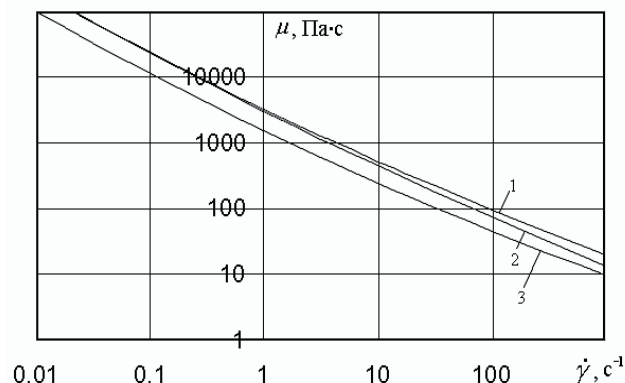


Рисунок 1. Зависимости коэффициентов эффективной вязкости от скорости деформации потока для соевой пасты с различным процентным содержанием воды: 1 – С=0; 2 –30%; 3 –60%

## 3. Результаты расчета температурного режима РПА

Результаты расчета полей скорости и температуры в рабочей зоне РПА при течении соевой пасты, содержащей 60% воды, представлены на рис. 2. Перепад давления  $\Delta p$  между входным и выходным сечениями рабочей зоны составляет 50 кПа., а скорость вращения ротора – 3000 об/мин. Температура среды на входе в рабочую зону равна  $30^\circ\text{C}$ .

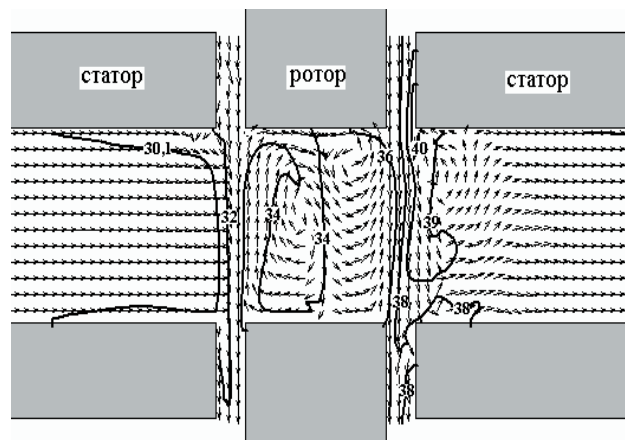


Рисунок 2. Поле температуры в потоке соевой пасты с 60 % содержанием воды

Как видно из рисунка, поле скорости в рабочей зоне РПА имеет сложную структуру. В прорезе внутреннего статора и на выходе из прореза внешнего статора оно практически безвихревое. Однако в прорезе ротора и на входе в прорезь внешнего статора имеет место интенсивное вихреобразование. Со

структурой течения связана интенсивность диссипативных тепловыделений в рабочей зоне.

Как видно из рис. 2, разогрев соевой пасты протекает наиболее интенсивно в зазорах между рабочими элементами и в областях с наибольшей завихренностью потока. Максимальная температура в потоке, значение которой составляет  $40^{\circ}\text{C}$ , наблюдается около левого внутреннего торца прорези внешнего статора.

Средняя температура жидкости в выходном сечении рабочей зоны равна  $38^{\circ}\text{C}$ , а суммарная мощность источников диссипативного тепловыделения в рабочем объеме составляет  $Q = 9620$  Вт.

Как следует из результатов численного моделирования, с уменьшением процентного содержания воды в соевой пасте существенно падают абсолютные значения среднемассовой радиальной скорости течения данной среды  $\bar{V}$  (рис. 3), которая характеризует ее расход через рабочую зону

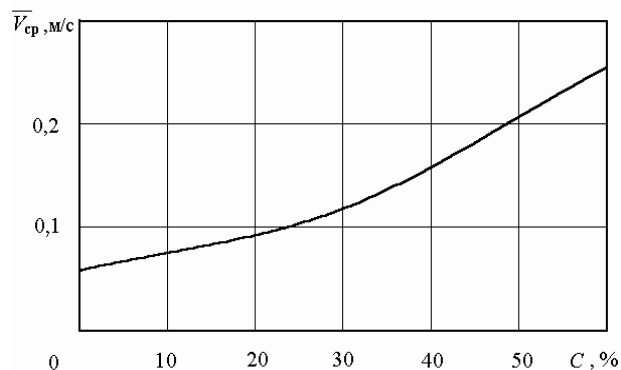


Рисунок 3. Зависимость от концентрации воды среднемассовой скорости течения соевой пасты через внутренний статор

Вследствие этого концентрированная соевая паста при обработке в РПА перегревается существенно, чем разбавленная.

Результаты расчетов полей скорости и температуры, выполненных для случая соевой пасты, содержащей 30% воды, свидетельствуют о том, что суммарная мощность источников тепловыделения в рабочей зоне по сравнению со случаем 60% содержания воды увеличивается незначительно (до  $Q = 9900$  Вт). Однако, при этом почти в 2 раза уменьшается расход обрабатываемой среды. Вследствие этого, ее средняя температура на выходе из рабочей зоны РПА возрастает до  $49^{\circ}\text{C}$ .

При дальнейшем уменьшении концентрации воды  $C$  возрастают значения эффективной вязкости потока, в результате чего еще более повышаются уровни диссипативного тепловыделения и уменьшаются при постоянном  $\Delta p$  расходы обрабатываемой среды через рабочую зону.

Потому при содержании воды  $C < 30\%$  соевая паста интенсивно перегревается. Зависимость степени перегрева  $\Delta T$  соевой пасты в рабочей зоне РПА от процентного содержания в ней воды представлена на рис.

4. Как видно из рисунка, при 15 % содержании воды обрабатываемая в РПА среда перегревается более, чем на  $40^{\circ}\text{C}$ .

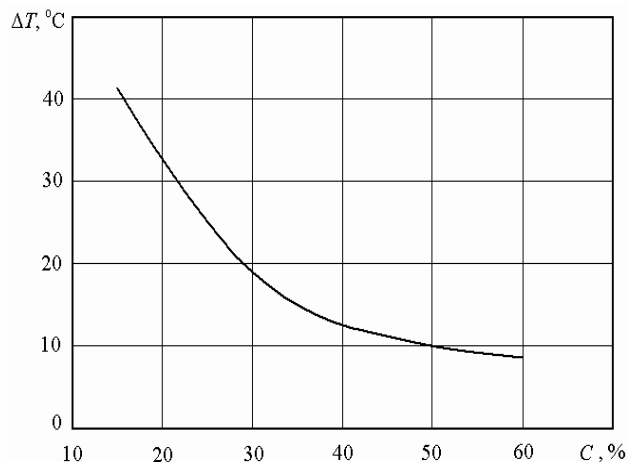


Рисунок 4. Зависимость степени перегрева соевой пасты, обрабатываемой в РПА, от концентрации воды

#### 4. Выводы

Как следует из представленных результатов численного моделирования температурных режимов роторно-пульсационного аппарата при обработке соевой пасты, с уменьшением процентного содержания воды в пасте значительно увеличивается степень ее перегрева. Следствием этого может быть как ухудшение качественных характеристик перерабатываемого продукта, так и повреждение рабочих элементов аппарата в связи с их перегревом. Поэтому при эксплуатации РПА в данном режиме необходимо обеспечить условия для эффективного отвода избыточных тепловыделений.

#### Литература

1. Басок Б.И., Гартвиг А.П., Коба А.Р., Горячев О.А. Оборудование для получения и обработки высоковязких дисперсных сред // Промышленная теплотехника. – 1996. – Т.18, №1. – с. 50 - 56.
2. Шульман З.П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей. – М.: Энергия, 1975. – 352 с.
3. Пироженко І.А. Гідродинаміка та теплові ефекти в циліндричному роторно-пульсацийному апараті: Автореф. дис. кандидата техн. наук /Інститут технічної теплофізики НАНУ – К., 2005 – 22 с.
4. Басок Б.И., Давыденко Б.В., Ободович А.Н., Пироженко И.А. Диссипация энергии в активной зоне роторно-пульсационного аппарата // Доповіді НАН України. –2006. –№ 12. – С.81 – 87.